

Global Report

탄소섬유강화폴리머 시스템으로 프리스트레스트가 적용된 콘크리트 교량 보의 설계

1. 요약문
2. 제 1 장 개요
3. 제 2 장 문헌 검토 및 현재 설계 관행
4. 제 3 장 연구결과
5. 제 4 장 연구결과물 및 성과
6. 제 5 장 장래연구에 대한 결과물과 추천 사항 요약

요약문

탄소섬유강화폴리머(CFRP)는 광범위한 토목공학응용분야에서 전통적인 건설자재의 대안으로 인정받고 있습니다. 이러한 적용의 예는 특히, 강재 프리스트레싱 긴장재가 부식되기 쉬운 혹독한 환경에서 콘크리트 교량 거더의 프리스트레싱 텐던으로 CFRP 케이블 또는 봉(Bar)을 사용하는 것입니다. 기존의 프리스트레스 강재에 비해서 CFRP는 높은 강도 대 중량 비율, 높은 강성 대 중량 비율 및 전기 화학적 부식에 대해 강점이 있습니다. 그것의 유망성에도 불구하고 CFRP 프리스트레싱 긴장재는 미국에서 교량건설에 자주 사용되지 않았습니다. 인정받은 설계기준이 부족하여 사용이 제한되었습니다.

이 보고서는 NCHRP 프로젝트 12-97, "CFRP 시스템으로 프리스트레싱된 콘크리트 교량 보의 설계를 위한 지침기준"에 따라 프리스트레스트 콘크리트 교량 거더에서 프리스트레싱 CFRP재료를 사용하기 위한 설계지침을 개발하기 위해 수행된 연구를 기술합니다. 제안된 지침과 연구결과는 교량응용분야에서 CFRP시스템의 사용을 촉진하고 발전하게 할 것으로 예상됩니다. 이러한 설계지침을 구현하는데 도움이 되도록 재료기준도 준비되었습니다. 기준은 여기에 포함된 조항의 배경, 근거 및 제한사항을 설명하는 주석 등으로 뒷받침됩니다. 또한 제안된 지침기준을 단계별로 사용하는 방법을 보여주는 5가지 설계 예제가 제공됩니다. 보고서는 연구결과요약 및 장래연구를 위한 권장사항으로 마무리됩니다.

제 1 장 개요

1.1 배경

탄소섬유강화폴리머 (CFRP) 텐던으로 콘크리트 교량을 프리스트레싱 하는 것은 지난 30년 동안 연구 주제였습니다. 여러 연구자들이 CFRP가 강재부식이 우려되는 거친 환경에서 프리스트레스트 콘크리트 교량 응용분야에서 강재 텐던에 대해 실천 가능한 대안이 될 수 있음을 보여주었습니다. 프리스트레싱 CFRP의 장점은 전기화학적 부식에 대한 내성, 높은 강도 대 중량 비율 및 높은 강성 대 중량 비율을 포함하는 고유의 재료 특성에서 비롯됩니다. 문헌 검토에 따르면 1988 년 이후 전 세계적으로 약 80개의 실증교량에서만 프리스트레싱 CFRP가 사용 되었습니다 주 교통부(DOT)와 컬럼비아 지역을 대상으로 실시한 조사에 대한 34개의 응답에 따르면, 미국에서 이 기술을 제한적으로 사용하는 주요원인은 잘 정의되고 확립된 설계기준이 없다는 것입니다. 제한된 수의 지침, 매뉴얼 및 해설서 외에도 현재 미국에서 CFRP 시스템으로 프리스트레스를 적용한 콘크리트 구조물설계에 사용할 수 있는 포괄적인 지침이 없습니다.

CFRP 시스템으로 프리스트레스를 받는 콘크리트교량의 설계는 CFRP 시스템 구성요소의 재료속성, 하중전달 메커니즘, 앵커리지특성, 지속하중 및 환경조건을 포함한 여러 요인에 따라 달라집니다. 본 보고서에서는 부착 및 비 부착 CFRP 프리스트레스 콘크리트 보의 공용가능성 및 강도설계를 CFRP 텐던의 응력한계 측면에서 다루었습니다. 여기에는 비 피복 / 피복 구성, 프리스트레스 손실, 휨 및 전단역량, 공용가능성 한계상태, 내구성, 피로, 부착, 전개 및 전달길이가 포함됩니다. CFRP 프리스트레스 콘크리트 보의 설계는 고강도, 탄성, 취성 및 직교이방성 복합재료의 사용과 관련된 요구사항 및 복잡한 거동을 특히 고려해야 합니다.

1.2 연구 목표

이 프로젝트의 목적은 프리텐서닝 또는 포스트텐션을 사용하여 CFRP 시스템으로 프리스트레스된 콘크

리트 교량 보의 설계를 위해 AASHTO 하중저항계수 설계(LRFD) 형식의 설계 및 재료지침기준을 개발하는 것이었습니다. 이 목표를 추구하면서 연구팀은 다음 사항을 고려했습니다.

- 구성이 다른 CFRP 케이블 또는 봉(Bar)을 프리스트레싱 하기위한 최대허용 재킹력에 대한 지침 설정
- 앵커시스템 사용상 제한사항에 대한 권장사항 제공
- 프리스트레싱 CFRP 케이블과 봉(Bar)의 이완과 그 앵커시스템 및 열 변동에 기인하는 프리스트레스 손실 측정
- 콘크리트 크리프 및 건조수축, 탄성단축 및 정착으로 인한 프리스트레스 손실을 검증
- CFRP 케이블 및 바(Bar)로 프리스트레스된 보의 전달길이, 캠버 및 장기간 편향정도를 정량화
- 원형 규모 교량 거더의 휨 거동 특성화
- LRFD 철학에 따라 CFRP 프리스트레스 보에 대한 강도저항계수를 교정

제 2 장 문헌 검토 및 현재 설계 관행

2.1 프리스트레싱에서 CFRP의 현재 적용

CFRP 프리스트레스 시행상태에 대한 정보를 수집하기 위해 주 교통부 (DOT) 및 컬럼비아 특별지구에 대한 조사가 수행되었습니다. 34개의 주 교통부가 조사에 응답했습니다. 단 하나의 주 교통부 (Michigan)만이 교량목록에 CFRP 프리스트레스 콘크리트 교량보가 포함되어 있다고 보고했습니다. 다른 주 교통부는 목록에 CFRP 프리스트레스 콘크리트 교량보가 없다고 보고했습니다. Michigan 주 교통부는 목록에 있는 교량의 설계 상세에 대한 정보를 제공했습니다. 이 정보에 따르면 AASHTO LRFD 교량설계기준 (2017; 이후 AASHTO LRFD라고 함)는 하중계수, 활하중분포, 콘크리트 허용응력, 탄성손실 및 일부 장기손실 구성요소를 결정하는데 사용되었습니다. ACI 440.4R-04 : FRP 텐던이 있는 콘크리트 구조물 프리스트레싱 (ACI Committee 440, 2011)은 구부러진 CFRP 바의 전단력 기준과 크리프 파열을 방지하기 위한 긴장재 응력을 결정하는데 사용되었습니다. Michigan 주 교통부는 또한 장기손실과 전단저항을 계산하기 위해 설계절차를 수정했습니다.

2.2 현장 적용

문헌 검토에 따르면 CFRP는 전 세계적으로 약 80개의 실증교량에서 프리스트레싱에 사용되었습니다. 7 개국의 여러 기술위원회가 CFRP의 내부 및 외부사용과 관련된 20개의 지침 및 기준을 발표했습니다. 이들은 참조 목록에 포함되어 있습니다. 또한 기술위원회와 협회, 엔지니어링 학회 및 제조업체는 CFRP 시스템으로 프리스트레스가 적용된 콘크리트 교량에 대한 정보와 사례를 제공 했습니다 [예 : ACI 440.4R-04 (2011); 매뉴얼 No. 5 : FRP를 사용한 콘크리트 구조물 프리스트레싱 (SIMTReC, 2008; 이후 SIMTReC 매뉴얼 No. 5라고 함); 시장 개발 협회; 및 CFRP 제조업체]. 또한 Khalifa et al. (1993)은 CFRP 텐던으로 건설된 보행자 및 도로교량의 사례를 수집했습니다.

제 3 장 연구결과

3.1 개요

CFRP 프리스트레스 보의 거동과 설계에 영향을 미치는 변수는 실험 및 분석프로그램에서 조사되었습니다. 실험프로그램에는 기존모델을 검증하고 설계지침기준을 개발하기위한 재료샘플, 소규모 보 와 각기둥, 원형규모 보시험이 포함되었습니다. 조사된 계수는 프리스트레스 이완손실, 크리프 및 건조수축

손실, 열 변동손실, 프리스트레싱 CFRP의 반복영향 특성, 프리스트레싱 재료유형, 내부 포스트텐션 적용을 위한 프리스트레싱 CFRP사용, 전달 및 전개 길이, 장 기간 CFRP 프리스트레스트 보의 장기 변형 거동이 있습니다. 제안된 설계 및 재료지침기준의 적합성을 평가하기 위해 분석조사가 수행 되었습니다. 여기에는 변수의 범위를 넓히고 실험프로그램의 결과를 보완하기 위해 유한요소법을 사용하여 강도감소 계수 및 수치시뮬레이션을 결정하기위한 확률적 조사가 포함되었습니다.

3.2 실험적 조사 결과

3.2.1 원형 규모 보 시험

실험 프로그램에는 12개의 실물크기 AASHTO Type I CFRP 프리스트레스트 콘크리트 보의 설계, 시공, 시험 및 분석이 포함되었습니다. 두 가지 유형의 CFRP 프리스트레싱 텐던이 포함 되었습니다 : 0.5 인치 직경의 고체원형 CFRP 바 및 단일가닥으로 함께 꼬인 7개의 개별 와이어로 구성된 0.6인치 및 0.76인치 직경의 CFRP 케이블(강재 프리스트레싱 인장재와 유사). 5개의 보가 포스트텐션 되었고 7개의 보가 프리텐션 되었습니다. 프리스트레스 전달시 콘크리트강도는 5.5 ~ 6ksi였습니다. 두 가지 휨 하중조건이 고려되었습니다(단조 및 주기 피로). 휨 시험을 위한 시험모체는 원문 표 3.1에 나와 있습니다. (보의 구성에 대한 자세한 내용은 부록 C에 나와 있습니다)

제 4 장 연구결과물 및 성과

4.1 프리스트레싱 CFRP 특성

4.1.1 인장강도 및 변형

설계에 사용되는 인장강도(f_{pu})는 ASTM D7290 (2017)에 따라 계산된 특성 값으로, 특정모집단의 5번째 백분위수 값에 대해 80 % 하한신뢰한계를 나타냅니다. 이러한 신뢰한계와 백분위 수 수준의 조합은 다른 토목공학재료와 유사한 LRFD에 대한 저항계수를 생성합니다. (ASTM D7290, 2017)

4.1.2 내구성

CFRP가 다양한 환경조건에 노출되면 강도가 감소합니다. 내구성 시험은 한 유형의 프리스트레싱 CFRP 제품에 대해 수행되었습니다. 그러나 다른 유형도 사용이 가능하므로 향후 기타 유형을 사용할 수 있습니다. 제안된 기준은 광범위한 CFRP를 포함하도록 의도되었으므로 문헌에 보고된 재료 및 상업적으로 이용 가능한 재료와 관련된 환경계수를 사용해야 했습니다. 콘크리트 부재에 포함된 프리스트레싱 CFRP의 경우 환경적 영향에 대한 장기노출은 문제가 되지 않지만, 프리스트레싱 CFRP를 외부에서 콘크리트 부재를 보강하기 위해 사용하고 환경영향에 노출될 경우 10%의 프리스트레싱 CFRP의 설계인장강도의 감소가 제시됩니다.

4.2 재킹 응력 제한

재킹 응력에 대한 제한은 긴장 후 휨에 대한 지정된 변형에 의해 제어됩니다.

4.2.1 휨에 대한 지정된 변형

본문 그림 4.1 및 4.2는 설계 강도 (f_{pu}), 파열강도 (f_{pr}), 설계에서 고려되지 않은 강도 ($f_{pr} - f_{pu}$), 70% 전달직전응력 (f_{pbt}), 유효프리스트레스 (f_{pe}), 스트레스 손실 ($f_{pbt} - f_{pe}$) 및 이 연구에 사용된 프리스트레스 CFRP 케이블 및 바(Bar)에 대한 극한공용응력을 보여줍니다. 재킹 후 지정된 변형률(esr)은 CFRP 케이블과 바를 각각 프리스트레싱 하는 경우 0.0046 및 0.0036입니다.

또한 프리스트레싱 CFRP 케이블의 설계강도의 비율은 프리스트레싱 CFRP 바에 대한 강도보다 설계에

서 더 크게 고려되지 않습니다. 보다 상세한 사항은 원문을 참조하시기 바랍니다.

제 5 장 장래연구에 대한 결과물과 추천사항 요약

5.1 조사 결과 요약

이 연구 작업은 교량적용을 위해 CFRP 시스템으로 프리스트레스를 가한 콘크리트 보의 설계를 위한 권장설계 및 재료지침기준을 만들었습니다. 이러한 설계 및 재료지침기준은 AASHTO 교량 및 구조물 위원회에 제공되었습니다. 다음은 연구결과의 몇 가지 주요내용입니다.

- 앵커리지 :

- 이 프로젝트에 사용된 모든 앵커리지는 프리스트레싱 CFRP 케이블의 설계인장역량(프리스트레싱 시스템의 필수부분인 앵커리지의 경우) 또는 재료시험 및 현장적용기간동안 프리스트레싱 CFRP 케이블과 봉(Bar)의 재킹 응력(스트레싱 시에만 사용되고 전달시 제거되는 앵커리지의 경우)을 포함하고 있습니다.

- 프리스트레스 손실 :

- 소켓 형 앵커에 대해 측정된 앵커리지 정착손실은 재킹 응력의 1.0 % 미만이었습니다.
- 강재 텐던(AASHTO LRFD, 2017)이 있는 프리텐션 및 포스트텐션적용에 대한 탄성단축손실을 계산하는 방정식은 CFRP 시스템으로 프리스트레스를 받은 빔에 대한 탄성단축손실을 계산하는데 적용됩니다.
- 프리스트레싱 CFRP 케이블 및 봉(Bar)의 응력완화손실은 CFRP 텐던의 길이와 무관합니다.
- 프리스트레스 CFRP 텐던의 응력완화와 시간의 대수사이에는 선형관계가 있습니다.
- 앵커리지가 프리스트레싱 시스템의 영구적인 필수부분인 CFRP 시스템과 앵커리지가 프리스트레싱 시스템의 영구적인 부분이 아닌 시스템에 대해 응력완화방정식이 개발되었습니다.
- 크리프 및 수축 손실을 평가하기위한 현재 AASHTO LRFD (2017) 방정식은 CFRP 텐던으로 프리스트레스를 받는 보에 적합합니다.
- 프리스트레스 CFRP 케이블과 봉(Bar)이 있는 프리스트레스 각기둥의 경우 프리스트레스 CFRP의 전달길이가 각각 16 인치와 24 인치 증가했습니다. 프리스트레싱 CFRP 케이블의 경우 점착열화로 인한 프리스트레싱 힘의 손실이 더 이상 발생되지 않았습니다. 그러나 프리스트레싱 CFRP 봉(Bar)의 경우 열 변동으로 인한 점착열화는 프리스트레싱 CFRP 봉(Bar)의 프리스트레싱 힘을 최대 40% 감소시켰으며, 프리스트레싱 CFRP 봉(Bar)의 미끄러짐을 발생시켰습니다.
- 프리스트레스 CFRP 케이블이 있는 포스트 텐션 빔의 마찰손실을 계산하기위한 현재 AASHTO 방정식이 적절합니다. 0.0004 (1/ft.)의 굴곡(wooble)계수와 0.2의 마찰계수가 폴리프로필렌 덕트의 CFRP 케이블에 대해 제안됩니다.

- 프리스트레싱 CFRP의 꺾임 :

- 프리스트레싱 CFRP 케이블은 CFRP 봉(Bar)보다 더 높은 인장역량 유지를 나타냈습니다.
- 조기파손(분할) 및 프리스트레싱 CFRP 바의 인장 역량이 10 °보다 큰 꺾임 각도에서 크게 감소했습니다.
- 꺾인 프리스트레싱 CFRP 바는 원래의 극한인장강도의 작은 비율을 보유합니다.
- 강재 텐던 프리스트레싱에 일반적으로 사용되는 1인치 강재 및 2인치 플라스틱 편향기는 CFRP 케이블 프리스트레싱에 적합하지 않았습니다.
- 20 인치 및 40 인치 직경편향기가 사용되었을 때 프리스트레싱 CFRP 케이블은 최대 20° 꺾임 각도에

대해 각각 설계인장강도의 90% 및 100% 이상을 유지했습니다.

- CFRP 케이블 및 봉(Bar) 전달 :
 - 프리스트레싱 CFRP 케이블 및 봉(Bar)의 전달길이는 프리스트레싱 CFRP 직경의 40 ~ 50배 범위였습니다.
 - 전달직전에 프리스트레스 수준을 CFRP 케이블 및 바의 설계인장강도의 각각 70 % 및 65 %로 제한하면 크리프파열파괴를 방지하고 굽힘 하중에 저항할 수 있는 충분한 여유응력을 제공할 수 있습니다.
- 원형규격 보 성능 :
 - 230만 번의 하중빈도는 CFRP 프리스트레스트 보의 강성 또는 강도에 영향을 미치지 않았습니다.
 - 접착되지 않은 포스트텐션된 보는 접착된 포스트텐션된 보와 프리텐션된 보에 비해 더 큰 변형성을 나타냈습니다.
- 휨 설계 :
 - 프리텐션 CFRP 보의 거동은 프리스트레싱 CFRP의 탄성계수, 부재의 콘크리트강도, 보강비율 및 프리스트레싱 수준에 따라 달라집니다.
 - 스패-깊이비율, 콘크리트강도, 프리스트레싱 비율 및 케이블 종단선형은 비 접합 텐던 응력의 증가에 영향을 미치는 주요 변수였습니다.
 - 균열 폭과 분포를 제어하고 비 부착 포스트텐션 타이드아치 거동을 방지하기 위해 최소한의 접착보강이 필요했습니다.

5.2 향후 연구를 위한 권장사항

이 프로젝트에서 보고된 결과를 더욱 향상시키기 위해 다음과 같은 연구가 권장됩니다.

- 연속적인 프리스트레스트 보에서 프리스트레싱 CFRP의 적용을 평가하는 연구. 이 프로젝트는 단순히 지지되는 보의 거동과 설계과정을 조사했습니다. CFRP 시스템을 프리스트레싱하는 연속 보, 특히 비 접합 포스트텐션 보에 대한 적용 및 설계과정을 평가하기위한 연구가 필요합니다.
- 포스트텐션 보에 대한 외부 적용하는 연구. 외부 CFRP 포스트텐션 보강으로 강화된 보에 대한 비 접착 포스트 텐션 보 설계의 적용가능성은 평가되지 않았습니다. 외부보강에 사용되는 CFRP 시스템에 대한 이러한 과정의 적용가능성을 평가하려면 연구가 필요합니다.
- 프리스트레스 CFRP 시스템에서 프리스트레스 보의 전단거동 연구. 이 프로젝트는 휨 고정 및 피로하중 하에서 강재보강으로 전단 보강된 단순 지지된 프리스트레스 보의 거동을 조사했습니다. 프리스트레싱 CFRP 시스템과 FRP로 휨 보강한 프리스트레스 보의 전단거동을 평가하기위한 연구가 필요합니다.
- CFRP 프리스트레스를 위한 꺾임 문제 연구.
 이 프로젝트는 꺾임 구성에서 프리스트레싱 CFRP를 적용하려면 편향기와 프리스트레싱 텐던 사이에 큰 접촉표면을 가진 대구경 꺾임 장치를 사용해야한다는 것을 보여주었습니다. 프리 캐스트 플랜트에서 큰 직경 (예 : 20 인치 및 40 인치)의 편향기 사용가능성을 조사해야 합니다. 또한, 프리스트레싱 CFRP와 강재 편향기 사이에 Teflon 또는 다른 폴리머와 같은 쿠션재료를 사용하면 프리스트레싱 CFRP 시스템의 꺾임 인장역량유지가 향상될 것으로 예상됩니다. 완충재료 유형과 꺾임 CFRP 케이블 또는 봉(Bar)의 사용에 대한 실험적 조사가 도움이 될 것입니다. 또한, 프리텐션 또는 외부 포스트텐션 보에서 편향된 또는 꺾인 종단선형이 있는 프리스트레싱 CFRP 시스템의 사용은 꺾인 인장재 종단

선형이 있는 CFRP 프리스트레스 보의 휨 거동에 대한 실험 및 분석조사에서 평가되어야합니다.

- 스트레스 완화 연구. 프리스트레싱 CFRP 시스템의 스트레스 완화손실은 실험실 온도 및 습도조건 하에서 평가되었습니다. 프리스트레싱 CFRP 시스템의 응력 완화에 대한 환경 조건 및 다양한 양카 상세사항의 영향을 조사해야합니다.
- 열 변동 효과 연구. 열 변동 사이클은 프리스트레싱 CFRP와 콘크리트 사이의 결합력을 저하시켜 프리스트레싱 내력을 감소시킵니다. 콘크리트 피복, CFRP 매입길이, 콘크리트 압축 및 인장강도가 이러한 열화에 미치는 영향을 조사해야합니다. 또한 프리스트레싱 CFRP와 콘크리트 사이의 접착 성능과 전개 연장에 대한 영향은 교량 보를 닮은 대형 표본에서 평가되어야합니다.

<원문제목> Design of Concrete Bridge Beams Prestressed with CFRP Systems

<원문출처> National Academy of Sciences(TRANSPORTATION RESEARCH BOARD)